

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Іващенко Максима Миколайовича «Структурні, оптичні та електрофізичні властивості плівок CdSe та ZnSe і гетеропереходів на їх основі», яка подана на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

Актуальність теми дисертації

Напівпровідникові прилади, які створено на основі плівкових елементів, визначають прогрес у багатьох напрямках науки і техніки. Серед можливих матеріалів для виготовлення напівпровідникових плівок завдяки своїм унікальним фізичним властивостям виділяються сполуки A_2B_6 . Фізичні властивості бінарних сполук та їх твердих розчинів мають широкий діапазон змін. На їх основі можливе виготовлення мікроелектронних приладів з унікальними можливостями. Їх можливо використовувати у різних пристроях оптики, акустики, електроніки, оптоелектроніки, ядерної фізики та ін. Наприклад, використання широкозонних сполук, в тому числі ZnSe, дозволяє створювати інжекційні світлодіоди, які випромінюють у різних областях спектру. Виробники сонячних елементів (СЕ) надають перевагу плівкам ZnSe, як альтернативі до CdS у шарах оптичних вікон. Незважаючи на менший ККД таких СЕ, вікна з ZnSe не містять у своєму складі «важкого» металу кадмію («Cd-free»). При створенні низькорозмірних структур (квантових точок, квантових ям, надіраток) шари з ZnSe, як бар'єрний матеріал, мають переваги завдяки великій ширині Σ . У свою чергу CdSe має оптимальну ширину Σ для використання як перший елемент тандемних СЕ, фотоелектрохімічних комірок, світлодіодів синьо-зеленої ділянки спектру. А завдяки високій фоточутливості його можна використовувати, як матеріал фотопровідних пристроїв, детекторів рентгенівського та гамма-випромінювання, сцинтиляційних детекторів. Але на даний час структурні, субструктурні, оптичні та електрофізичні властивості тонких плівок CdSe та ZnSe вичені недостатньо. Ще в меншій мірі вивчені властивості гетеропереходів (ГП) $p\text{-ZnTe}/n\text{-CdSe}$, $n\text{-ZnSe}/n\text{-CdSe}$. На даний момент не в повній мірі з'ясовані механізми проходження струму через такі ГП. Також не в повній мірі вивчені і структурні особливості таких ГП.

Серед методів отримання плівок CdSe та ZnSe та елементів на їх основі метод конденсації у квазізамкнутому об'ємі (КЗО) вирізняється не лише порівняно простою технологією, але і можливостями контролю параметрів плівок шляхом зміни

температури підкладки. Нажаль робіт, присвячених вивченню параметрів і особливостей плівок CdSe та ZnSe, отриманих конденсацією у КЗО, відомо достатньо мало.

Тому дослідження, які виконані в дисертації Іващенко М.М., є актуальними і містять результати, які необхідні для створення і вдосконалення сучасних, широко розповсюджених і затребуваних приладів геліоенергетики, відображення інформації, детекторів випромінювання.

Зв'язок з науковими програмами

Дисертаційна робота Іващенко М.М. пов'язана з дослідженнями, які виконувалися і виконуються в межах держбюджетних НДР в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України. Ці дослідження включають такі теми:

- «Дослідження електрофізичних, оптичних структурних характеристик тонких плівок і багат шарових структур на основі сполук A_2B_6 та їх твердих розчинів» (номер державної реєстрації 0107U00192, 2007-2009pp.),
- «Отримання та дослідження плівок телуриду кадмію і твердих розчинів на його основі для СЕ та детекторів випромінювання» (номер державної реєстрації 0110U001151, 2010-2012pp.).

Іващенко М.М. є виконавцем даних НДР. Дослідження, які виконані в його дисертаційній роботі, є суттєвим внеском в ці НДР.

Окрім того, Іващенко М.М. проводив дослідження у рамках теми «Дослідження структурних, оптичних, електрофізичних характеристик нових буферних шарів тонкоплівкових СЕ на основі телуриду кадмію» у держбюджетній темі №0109U001387 (2009-2011pp.) Міністерства освіти і науки України, спільного проекту науково-технічного співробітництва «Використання нових матеріалів буферних та поглинальних шарів для дешевих плівкових полікристалічних СЕ на основі ГП» (2011-2013pp.) між Сумським державним університетом та університетом Соганг (Сеул, Південна Корея), та брав участь у підготовки проміжних звітів.

Аналіз змісту дисертаційної роботи

Повний обсяг дисертаційної роботи Іващенко М.М. становить 163 сторінки і складається зі вступу, 5 розділів, висновків, містить 51 рисунок, 21 таблицю та переліку використаних джерел, який включає 199 найменувань.

У вступі Іващенко М.М. обґрунтовує актуальність дослідження структури і властивостей плівок CdSe та ZnSe і гетеропереходів на їх основі, які отримано методом конденсації у КЗО. Наводяться відомості про отримані наукові та практичні результати.

У першому розділі дисертації проведено огляд публікацій за темою дисертації. Показані основні фізичні властивості сполук CdSe і ZnSe, та методи їх отримання. Описано області приладового застосування структур на основі цих сполук. Більш глибоко проаналізовано структурні, оптичні електрофізичні властивості конденсатів CdSe і ZnSe, основні фізичні процеси, які відбуваються при поглинанні світлового випромінювання. Окремий підрозділ присвячено властивостями ГП та методам и програмним пакетам моделювання СЕ на їх основі.

Висновки до розділу 1 обумовлюють формулювання завдань роботи. Серед них, як найбільш важливі, можна вирізнити такі:

- визначити умови отримання однофазних структур з низьким рівнем макро- та мікродеформацій, дефектів пакування, двійників та дислокацій методом термічного вакуумного випарування в КЗО;
- вивчити властивості ГП $p\text{-ZnTe}/n\text{-CdSe}$, $n\text{-ZnSe}/n\text{-CdSe}$, їх структурні особливості, механізми струмоперенесення, створити наукове підґрунтя для подальшої оптимізації їх конструкційних параметрів.

У другому розділі розглянуто експериментальні та теоретичні методики, які були застосовані для проведення досліджень.

На початку розділу формульовано завдання роботи, що досить повно визначають технологічні та фізичні етапи досліджень та числове моделювання ВАХ ГП і розрахунок оптичних втрат СЕ. А саме:

- розробити методику нанесення плівок CdSe та ZnSe з відтворюваними характеристиками для визначення оптимальних умов, що забезпечують параметри плівок, які необхідні для їх використання як базових шарів реальних приладів мікроелектроніки та геліоенергетики;
- дослідити структурні та субструктурні особливості плівок, їх оптичні та люмінесцентні властивості, та встановити кореляцію між ними в залежності від режимів нанесення;
- провести комплексне дослідження електрофізичних характеристик ГП, що включає визначення структурних та субструктурних властивостей, механізмів зарядоперенесення, моделювання темнових та світлових ВАХ СЕ;
- розрахувати оптичні втрати світла в допоміжних та віконних шарах СЕ.

В подальших підрозділах автор коротко, але чітко прописав склад установок та апаратури, що були використані при створенні зразків плівок та дослідженні їх параметрів. При цьому кожен раз автор пояснював, якими саме фізичними та математичними методами він користувався при проведенні експерименту, або обробці його результатів. З тексту розділу (і всієї роботи в цілому) видно, що під час дослі-

джень автор освоїв не менш 10 сучасних технологічних та вимірювальних установок, більш 10 методів обробки результатів та більш ніж 5 програмних пакетів. Та, як можна зрозуміти з тексту розділу, для досліджень спектру раманівського розсіювання та електровимірювань ВАХ і σ - T залежностей було створено ексклюзивні вимірювальні установки.

Третій розділ присвячено докладному викладенню результатів експериментальних досліджень морфології поверхонь, структури та субструктури плівок CdSe та ZnSe, які отримано методом конденсації у КЗО.

При дослідженні морфології поверхонь плівок, які отримані за різних умов, значну увагу приділено аналізу механізмів їх росту, які теж у свою чергу, залежать від умов нанесення. Отримані результати докладно обґрунтовуються з фізичної точки зору. Зміни параметрів плівок (розмір, форма зерен, тощо) пояснюються співставленням з режимами та умовами нанесення.

Далі також ретельно та обґрунтовано проводився аналіз структур та субструктур плівок CdSe та ZnSe, також отриманих при різних умовах, насамперед при зміні у широкому діапазоні температури підкладки.

Фазовий аналіз проводився дифрактометричним методом та високороздільною електронною мікроскопією плівок. Визначення умов отримання однофазних плівок стабільної кристалічної модифікації безпосередньо потрібно для уникнення „старіння” елементів на їх основі. При аналізі текстур конденсатів усім випадкам також дано пояснення і показано зв’язок з фізичними факторами – як мінімум на евристичному рівні. Рентгендифрактометричне визначення періоду ґратки надзвичайно чутливою до зміни стехіометрії матеріалу, введення домішок, окислення та ін., тому автором проводилося визначення періодів ґраток як шихти, так і та плівок CdSe і ZnSe, які отримано при різних режимах конденсації. Визначення середнього розміру областей когерентного розсіювання та рівня мікродеформацій у конденсатах проводилося за фізичним уширенням дифракційних піків (100)-(200), (101)-(202) та (002)-(105) гексагональної фази. Показано, що рівень мікродеформацій суттєво залежить від напрямку вимірювання.

У висновках до цього розділу дано перелік встановлених фізико-технологічних умов контролю параметрів плівок та отримання високоякісних однофазних конденсатів CdSe та ZnSe, придатних для приладового використання.

Четвертий розділ присвячено експериментальному визначенню оптичних та електрофізичних параметрів плівок CdSe та ZnSe, які також отримані при різних режимах конденсації. У першому підрозділі проведено ретельне експериментальне

визначення спектрів поглинання, відбивання і пропускання плівок, їх оптичної густини та дана оцінка ширини ЗЗ, значень коефіцієнтів заломлення та екстинкції. Дано порівняння в даними інших авторів, різниці пояснено від'ємностями технологій. Наприкінці підрозділу наведені спектральні розподіли реальної та уявної частин діелектричних сталих плівок CdSe та ZnSe. Отримані результати добре корельовані з структурою плівок, які отримано при різних температурах підкладки.

У наступному підрозділі приведені результати досліджень низькотемпературної фотолюмінесценції плівок CdSe. Проведено глибокий аналіз та дана їх інтерпретація з урахуванням наявних літературних даних. Далі також з наявних літературних даних подано результати досліджень Раманівського розсіювання плівок ZnSe, які отримано при різних температурах підкладки. На спектрах виявлено піки, що були інтерпретовані, як TO і LO моди та їх фонони повторення. Присутність на спектрах фононних повторень LO мод високого порядку підтверджує висновок структурних досліджень про високу якість плівок. Наприкінці розділу приведено результати вимірювань ВАХ плівок ZnSe. Аналіз цих ВАХ та σ - T залежностей дозволив виявити у плівках ZnSe, отриманих в різних фізико-технологічних умовах, ряд пасток з різними глибинами залягання.

У висновках до розділу зведено результати, які мають цінність для приладобудівного використання.

У **п'ятому розділі** автор за допомогою числового експерименту визначає вихідні параметри елементів та приладів на їх основі. Для цього серед багатьох програмних продуктів, що зараз існують, автор обрав SCAPS-3200 та обґрунтував його використання, як найбільш оптимального для конкретних задач роботи.

На оцінку автора, числове моделювання оптичних втрат багат шарових структур може привернути увагу дослідників до впливу товщин віконних шарів на параметри СЕ. Ретельно проведено моделювання ВАХ СЕ та спектральних залежностей квантового виходу. Далі дана оцінка морфології границь у експериментально отриманих ГП методом конденсації у КЗО, структурним та субструктурним властивостям шарів у гетеросистемі ZnTe/CdSe. Експериментально досліджено зміну рівня мікродеформацій та розміру ОКР при зміні температури осадження. На думку автора при гетероепітаксiальному нарощуванні високотемпературних плівок ZnTe на CdSe зникає дрібнодисперсний перехідний шар на межі матеріалів.

Дослідження темнових ВАХ ГП ZnTe/CdSe показало, що механізм проходження струму через ГП визначається якістю межі поділу напівпровідникових матеріалів. При збільшенні кількості поверхневих дефектів на цій межі відбувається зміна механізму перенесення носіїв через перехід. В області напруг зміщення $U < 0,5$ В в

структурах реалізується емісійно-рекомбінаційний механізм струмоперенесення, а вище цієї напруги тунельно-рекомбінаційний. Коефіцієнт ідеальності ВАХ досліджених ГП змінюється в діапазоні 2,15- 2,48.

У **висновках** викладені найбільш важливі наукові та практичні результати, які отримано в дисертації.

Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність.

Аналіз змісту дисертаційної роботи Іващенко М.М. дозволяє зробити висновок про те, що на захист представлена завершена наукова робота, в якій:

- створено експериментально-методологічний комплекс для отримання в різних режимах і при різних умовах плівок та структур з напівпровідникових сполук A_2B_6 і визначення параметрів отриманих матеріалів у широкому спектрі фізичних властивостей;
- виявлено впливи режимів і умов конденсації плівок у КЗО на їх структурні і субструктурні особливості, морфологію поверхонь, електричні і оптичні характеристики;
- виявлено велику низку факторів, що обумовлюють якість плівок та структур на їх основі, для чого у текстах 3,4 і 5 розділів приведено результати ретельного, багатопланового аналізу фізичних факторів, що впливають на параметри плівок та ГП на їх основі, який проведено з урахуванням наявних літературних даних, показано, що метод КЗО дозволяє створити досконалі компоненти СЕ, приладів мікроелектроніки, фото- і оптоперетворювачах;
- збільшення практичної значимості роботи досягнуто використанням числового моделювання на ПЕОМ, яке проведено для отримання ВАХ плівок, визначення механізмів струмоперенесення у ГП і оптичних втрат у їх шарах;
- отримані результати використані в звітах по НДР, що проводяться в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України та спільного проекту науково-технічного співробітництва між Сумським державним університетом та університетом Соганг (Сеул, Південна Корея).

Таким чином, дисертація Іващенко М.М містить комплекс досліджень і розробок, у яких охоплені питання від техніки та технологій виготовлення плівок CdSe і ZnSe, їх тестування та застосування, що передбачено завданням та метою роботи. Це дозволяє стверджувати, що **дисертаційна робота Іващенко М.М.** на тему «Структурні, оптичні та електрофізичні властивості плівок CdSe та ZnSe і гетеропереходів на їх основі», є **завершеною**.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність.

Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації, досить обґрунтовані і достовірні, так як вони є наслідком основних положень і закономірностей теорії дифракції, фізичної теорії метеорів, теорії розсіювання радіохвиль іонізованими слідами метеорів, статистичної теорії радіолокації метеорів. Вони сформульовані на основі ретельно проведеного автором теоретичного аналізу, результатів експериментів та чисельного моделювання, порівняння отриманих розрахункових даних з результатами відомих теоретичних та експериментальних досліджень. Результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на багатьох міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах.

Наукова новизна дисертаційної роботи

Наукова новизна дисертації Іващенко М.М. полягає в наступному.

1. Уперше були визначені сталі ґратки (a , c) вюрцитної фази CdSe з використанням процедури підвищення точності, що дозволило встановити вплив температури підкладки на значення a , c та їх відношення c/a . В результаті встановлено, що це відношення складно змінюється залежно від температури конденсації плівок в інтервалі від 1,631 до 1,621, що обумовлено зміною стехіометрії матеріалу.

2. Уперше отримані спектри раманівського розсіювання від полікристалічних плівок ZnSe, нанесених при різній температурі підкладки методом КЗО. Піки, виявлені на спектрах, були інтерпретовані як TO– і LO–моди та їх фононні повторення, що підтверджує висновок структурних досліджень про високу якість таких плівок.

3. Виявлено зв'язок оптичних, люмінесцентних та електричних властивостей плівок селеніду кадмію і цинку зі структурними особливостями конденсатів.

4. Встановлена залежність морфології поверхні, структурних та субструктурних характеристик плівок CdSe та ZnSe від фізико-технологічних умов отримання у КЗО. З'ясовані оптимальні фізико-технологічні умови отримання ГП p -ZnTe/ n -CdSe, а саме, при підвищенні температури підкладки до 673 K відбувається процес гетероепітаксialного нарощення шару ZnTe на підшарі CdSe у межах полікристалічних зерен, що покращує характеристики гетероструктур.

5. Визначені основні параметри механізмів струмоперенесення через ГП та зміни коефіцієнту ідеальності ВАХ, показано, що найнижчого значення цей коефіцієнт набуває в системах, отриманих при $T_s \leq 673$ K.

6. Уперше з використанням числового моделювання процесів відбиття та поглинання світла, темнових та світлових ВАХ, квантового виходу СЕ на основі ГП

ZnTe/CdSe і ZnSe/CdSe визначені їх експлуатаційні параметри залежно від товщини поглинальних і віконних шарів, температури експлуатації. Встановлено межі втрат та максимальну ефективність СЕ.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційної роботи Іващенко М.М. мають достатнє практичне значення, бо в ній описана велика кількість реальних експериментів, яким дано зрозуміле фізичне пояснення. Тому, не затримуючись на кожному експерименті окремо, можна узагальнити, що одержані в дисертаційній роботі результати мають як фундаментальне, так і прикладне значення, а нова інформація про кристалічну структуру та субструктуру, морфологію поверхні плівок та меж їх сполуки, їх оптичні та електрофізичні характеристики, залежно від фізико-технологічних режимів конденсації може бути використана для виготовлення високоефективних приладів мікро-, опто-, акустoeлектроніки та геліоенергетики, та сприяє подальшому розвитку основ матеріалознавства бінарних сполук групи A_2B_6 .

Окрім того можна виділити наступне: ГП ZnSe/CdSe, які отримані методом конденсації в КЗО, можуть бути використані як перший елемент тандемних фотоперетворювачів сонячної енергії, фотодетекторів, детекторів жорсткого випромінювання; одношарові плівки CdSe, ZnSe з оптимізованими параметрами – як базові шари різноманітних приладів мікро- та оптоелектроніки; результати моделювання характеристик СЕ на основі ГП ZnTe/CdSe та ZnSe/CdSe, методика розрахунку оптичних втрат світла можуть використовуватися при оптимізації конструкції СЕ.

Результати дисертаційної роботи Іващенко М.М. використані у звітах по НДР, що проводяться в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України, та у навчальному процесі.

Апробації та публікації результатів дисертаційної роботи, повнота їх викладу

Основний зміст дисертації Іващенко М.М. викладено у 7 статтях, опублікованих у періодичних журналах, які входять до Переліку Міністерства освіти і науки України, та 1 статті в збірнику наукових праць Міжнародної конференції. В опублікованих роботах достатньо повно викладено зміст дисертації, положення, висунуті на захист, результати досліджень і висновки дисертаційної роботи.

Наукові положення, які винесено на захист, обговорювалися на 13 міжнародних та міжвузівських науково-технічних конференціях, про що свідчать опубліковані тези доповідей у трудах цих конференцій.

Таким чином, основні результати дисертації достатньо повно апробовані та відомі фахівцям.

Повнота відображення результатів дисертаційних досліджень і вимоги до кількості публікацій відповідають вимогам, встановленим Міністерством освіти і науки України.

Оформлення та відповідність змісту автореферату й дисертаційної роботи

Оформлення, обсяг дисертації, стиль і мова викладу, структура відповідають встановленим вимогам Міністерства освіти і науки України до кандидатських дисертацій. Робота викладена з коректним використанням науково-технічної термінології. Завдання та їх рішення викладені аргументовано.

В авторефераті наведено мету, завдання, об'єкт, предмет і методи досліджень, наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів. Вказується особистий внесок автора в кожну публікацію. Наведено відомості про впровадження та апробацію результатів дисертаційних досліджень.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертаційної роботи досить повно.

Оформлення дисертації та автореферату відповідає встановленим вимогам.

Області можливого використання результатів дисертації

Областями можливого використання результатів дисертації Іващенко М.М. можуть бути:

- розробка та промислове виготовлення СЕ, фото- та оптоелементів електронної апаратури;
- наукові дослідження;
- освітні напрямки підготовки фахівців в області мікроелектроніки та технології виробництва елементів радіоапаратури.

Зауваження по дисертаційній роботі і автореферату

Незважаючи на те, що дисертаційна робота Іващенко М.М. відрізняється високим рівнем досліджень, в ній є ряд недоліків.

1. За рахунок чого, або за яких обставин „плівки CdSe” стали „хімічно чистими” (стор.110) ?
2. З тексту неясно, які дані покладено у основу розрахунків спектральні залежності

коефіцієнту відбиття від шарів СЕ (стор.112) ? Ті, що отримані автором, або інші? Оптичні властивості CdSe – отримано в підрозділі 4.1, (стор.90, стор.94).

3. Чім пояснюється екстремуми загального рівня поглинання, пропускання, розсіювання, властивостей плівок, які отримано при T_s 550-650 К – підрозділи 4.1,4.3 ? „На нашу думку, ці піки може давати матеріал підкладки.” (стор.104 – це мало ймовірно, а якщо так, то чому?). Нема узагальнюючого пояснення, яке може бути пов’язане з структурою плівок.
4. У другому розділі описано великий об’єм робіт, що дозволило створити методичну та експериментальну базу досліджень, але у висновках до розділу просто перелік того, що вибрано, а не обґрунтування такого вибору, або його достатності для даних досліджень.
5. У тексті є деякі похибки стилю викладення, а саме: „Можливість освітлення ГП як з фронтальної, так і з тильної сторони” (стор.38) у роботі це стосується програмного продукту; „...дозволяє отримувати метод термічного вакуумного випарування в КЗО” (стор.39), хоча згідно контексту „...дозволяє використовувати метод..”; „...мілнокристалічного шару” (стор.62) – потрібно „дрібнокристалічного”; графічні позначки на рис.2.2 (стор.52) не наглядні, незрозумілі пояснення рис.3.6 (стор.69), тощо.

Висновки

Зазначені недоліки не знижують загальної високої оцінки роботи. Представлена Іващенко М.М. дисертація на тему «Структурні, оптичні та електрофізичні властивості плівок CdSe та ZnSe і гетеропереходів на їх основі» є завершеною науковою працею на актуальну тему. В цій роботі формулюється і вирішується актуальна наукова задача – дослідження умов створення та отримання заданих параметрів напівпровідникових плівок на основі сполук A_2B_6 . У дисертації отримано нові наукові результати, які підтверджено результатами експериментів і обґрунтовано з фізичних точок зору. Проведено комплексне моделювання конкретних компонентів напівпровідникових приладів, яке надало більшу практичну значимість отриманим результатам.

Автореферат відповідає змісту дисертаційної роботи, результати досліджень повністю відображені в публікаціях. Їх кількість і повнота відображення повністю відповідають вимогам Міністерства освіти і науки України.

За своєю тематичною спрямованістю дисертаційна робота Іващенко М.М. відповідає паспорту спеціальності 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем, і вимогам Міністерства освіти і науки України, а саме пунктам 11, 13, 14 «Порядку при-

судження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», тому Іващенко М.М. заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем .

Проректор з наукової роботи
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
доктор фіз.-мат. наук, професор



[Signature]
Сліпченко М.І.

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ:
Начальник відділу кадрів
"30" 09 2014р.

[Signature] * *Л.М. Кондратенко*